

REC'D 19 SEP 2003

WIPO PCT

EPO-BERLIN

23-08-2003

PRIORITY DOCUMENT
SUBMITTED OR TRANSMITTED IN
COMPLIANCE WITH
RULE 17.1(a) OR (b)



**Prioritätsbescheinigung über die Einreichung
einer Patentanmeldung**

Aktenzeichen: 102 31 463.2

Anmeldetag: 05. Juli 2002

Anmelder/Inhaber: Laser- und Medizin-Technologie
GmbH Berlin, Berlin/DE

Bezeichnung: Verfahren zur Mikrostrukturierung von
Lichtwellenleitern zur Erzeugung von
optischen Funktionselementen

IPC: G 02 B 6/26

**Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ur-
sprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.**

München, den 24. Juli 2003
Deutsches Patent- und Markenamt
Der Präsident
Im Auftrag

Ebert

Titel:

**Verfahren zur Mikrostrukturierung von Lichtwellenleitern zur
Erzeugung von optischen Funktionselementen**

5

Erfinder: Dr. David Ashkenasi (45 %), LMTB GmbH,
Dr. Arkadi Rosenfeld (30 %), MBI (Tel.: 6392-1214),
Verena Knappe (15 %), LMTB GmbH,
Prof. Dr. Gerhard Mueller (10 %), LMTB GmbH,

Zusammenfassung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Mikrostrukturierung von Lichtwellenleitern in der Grenzfläche zwischen Faserkern und Fasermantel
5 mittels eines ultrakurzen Laserimpulses oder einer Folge von ultrakurzen Laserimpulsen mit definiertem Energieeintrag und Modifikationstiefe zur Steuerung der Plasmadichte am definierten Ort, die eine Modifikation der optischen Eigenschaften und Strukturen an diesem definierten Ort an der Grenzfläche erzeugt, um eine effektive Aus- bzw. Einkopplung von Licht in
10 den Lichtwellenleiter zu ermöglichen.

Titel:**Verfahren zur Mikrostrukturierung von Lichtwellenleitern zur Erzeugung von optischen Funktionselementen**5 Aufgabenstellung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Mikrostrukturierung von Lichtwellenleitern mittels mindestens eines ultrakurzen Einzelpulses oder einer Pulsfolge mit definiertem Energieeintrag und Modifikationstiefe in den Lichtwellenleiter zur Erzeugung von Strukturen, die eine effektive Aus- bzw. Einkopplung von Licht in den Lichtwellenleiter ermöglichen.

Die direkte Mikrostrukturierung von Lichtwellenleitern aus verschiedenen Materialien (Quarz, Glas, Glaskeramik, Kunststoffen, Fluoriden oder ähnlichen transparenten Materialien bzw. Materialkombinationen) umfasst hier die Modifikation des Lichtwellenleiters, die zu einer Änderung seiner optischen Eigenschaften (z. B. Transmissionsänderung durch Brechungsindexänderung oder auch massiven Materialabtrag oder Transformation der Phase des Materials) an der bestrahlten Stelle führt.

20 Stand der Technik

Bisher sind dem Stand der Technik nach Verfahren bekannt, bei denen (beispielsweise in DE 197 39 456 beschrieben) mit einem Einzelpuls oder einer Pulsfolge definierter Zahl die Modifikationen im Kern des Lichtwellenleiters erzeugt werden, wobei die Pulsintensität so gewählt ist, dass die Zerstörschwelle je Einzelpuls überschritten wird und durch die Mikroexplosion im Material Streuzentren entstehen, so dass es zu einer Abstrahlung der im Lichtwellenleiter geführten Strahlung in alle Richtungen kommt.

Für Materialveränderungen im Mikrometerbereich werden aufgrund des geringen Energieeintrags Laserpulse mit einer Dauer von einigen Zehn Nanosekunden bis Sub-Pikosekunden, wie in der Veröffentlichung Phys. Rev. Lett. **74**, 2248-2251 (1995) berichtet, verwendet.

5

Bei den dem Stand der Technik nach bekannten Lösungen zur Erzeugung von optischen Funktionselementen in Lichtwellenleitern treten Probleme bezüglich der steuerbaren Aus(- bzw. Ein-)kopplung des Lichts aus (bzw. in) den Lichtwellenleitern auf, die eine gesteuerte Aus- bzw. Einkopplung von Licht in den Lichtwellenleiter nicht ermöglichen; da speziell bei dem in DE 197 39 456 angegebenen Verfahren das Licht radial aus dem Lichtwellenleiter austritt. Weiterhin ist die Erzeugung von Gitterstrukturen in den Lichtwellenleitern nach US 6,384,977 nur auf photosensitive Materialien beschränkt.

15

Es ist deshalb Aufgabe der Erfindung, ein Verfahren zur direkten Mikrostrukturierung von Lichtwellenleitern beliebiger Materialkompositionen anzugeben, bei dem die genannten Nachteile vermieden werden.

20

Erfindungsgemäße Lösung

25

30

Das erfindungsgemäße Verfahren zeichnet sich dadurch aus, dass auf eine Oberfläche des Körpers ein Laserstrahl gerichtet wird, für den das Material durchlässig ist. Um Irrtümer zu vermeiden, bezieht sich der hier verwendete Ausdruck "durchlässig" und „transparent“ unter Bezugnahme auf ein Material, in dem der Strahl hoher Leistungsdichte in einer definierten Tiefe eingebracht wird. Bei einer bevorzugten Ausführungsform ist das Material der Lichtwellenleiter für elektromagnetische Strahlung durchlässig oder auch nur teildurchlässig. Die mit ultra-kurzen Laserimpulsen erzielbare hohe Leistungsdichte des Laserstrahls induziert am definierten Ort im Materialinnern nicht-lineare optische Effekte der Anregung, so dass eine sehr lokale Energieeinwirkung im transparenten Material erfolgt. Abhängig der

Materialkombination und der Leistungsdichte des Laserstrahls können so am definierten Ort Veränderungen in optischen Eigenschaften erzielt werden, die als Modifikationen bezeichnet werden. Die laser-induzierte Plasmadichte an freien Elektronen im Material kann durch den Einsatz von Laserimpulsen kontrolliert werden. Da der Energietransfer und somit die Materialreaktion bzw. Materialmodifikation stark vom induziertem Plasma abhängig ist, wird in der erfindungsgemäßen Lösung eine Plasmadichtesteuerung durch den Einsatz geeigneter Laserimpulse angestrebt. Die Wechselwirkung zwischen Laserstrahlung und dem Material zur Herstellung von Lichtwellenleitern hängt stark von dem Verhältnis der Energiedichte zur gewählten Leistungsdichte der betreffenden Laserstrahlung ab. Erst die Verwendung von zeitlich modulierter Laserstrahlung steigert das Verhältnis zwischen der Leistungsdichte und der Energiedichte eines Einzelpulses. Für das erfindungsgemäße Verfahren ist es notwendig, mit hoher Leistungsdichte bei geringer Energiedichte zu arbeiten, um die Voraussetzung für eine Plasmadichtesteuerung zu gewährleisten. Eine Leistungsdichte ab ca. 10^{10} W/cm^2 bewirkt eine effiziente Einkopplung der Laserenergie überwiegend über nicht-lineare optische Effekte der Multiphotonen-Absorption, Tunnel- und Kaskaden-Ionisation. Diese Grenze der Leistungsdichte wird bei der Fokussierung von Laserstrahlung mit Laserimpulsen von 10^{-10} s bereits mit Einzelpulsenergie unter 10 nJ erreicht. Um die Lokalisierung der Energie im Volumen zu ermöglichen, wird in diesem Verfahren der Einsatz von Laserstrahlung in einem Spektralbereich vorausgesetzt, für die das Bauteil durchsichtig bleibt, bis die Laserstrahlung aufgrund der Fokussierung eine kritische Leistungsdichte von ca. 10^{10} W/cm^2 erreicht.

Die Aufgabe wird durch ein Verfahren der eingangs genannten Art dadurch gelöst, dass erfindungsgemäß der Lichtwellenleiter nicht im Kern, sondern definiert an der Grenzfläche zwischen Lichtwellenleiterkern und Lichtwellenleitermantel modifiziert wird und sowohl die Energie als auch die Dauer des Pulses in Abhängigkeit vom zu bearbeitenden Material so eingestellt wird, dass mittels der Plasmadichtesteuerung entweder durch massive Mikroschädigung ein Streuzentrum oder nur eine Phasenänderung

des Materials oder nur eine Materialmodifikation durch Brechungsindexänderung entsteht, je nach gewünschtem Funktionselement, wobei im letzten Fall die vorher an der Grenzfläche zwischen Lichtwellenleiterkern und Lichtwellenleitermantel existierende Totalreflexion
5 vermindert oder gänzlich unterdrückt wird.

Das erfindungsgemäße Verfahren, bei dem die Modifikation in der Grenzfläche zwischen Lichtwellenleiterkern und Lichtwellenleitermantel erfolgt, wird mit einem Laser für die Plasmadichtesteuerung geeigneter
10 Pulslänge durchgeführt. In einer bevorzugten Ausführungsform liegen die Laserimpulsdauern zwischen 0,1 und 50 ps. Die Wellenlänge des Laserlichts wird so gewählt, das diese für das Material bis zu einer für die Plasmadichtesteuerung kritischen Leistungsdichte durchlässig ist. Zur Induzierung einer Plasmadichte und zur Herstellung einer Modifikation an
15 einem definierten Ort, hier an der Grenzfläche Faserkern-Fasermantel, wird der Laserstrahl in den Lichtwellenleiter fokussiert. In einer bevorzugten Ausführungsform erfolgt die Fokussierung des Laserlichtes mit Hilfe eines Mikroskopobjektivs in einem Winkel von 90° zum Lichtwellenleiter so, dass die Laserstrahlung durch den Fasermantel auf die Grenzfläche zum Faserkern
20 auftrifft. Andere Ausführungsformen der Laserstrahlführung sind denkbar, z.B. andere Winkel, Einsatz von Immersionsflüssigkeiten, andere Fokussierungshilfen (Spiegeloptik); entscheidend für das erfindungsgemäße Verfahren und die Vorrichtung ist eine für die Plasmadichtesteuerung ausreichende Leistungsdichte am definierten Ort der Grenzfläche.

25 Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren hängt die Anordnung und Struktur der Modifikationen im Lichtwellenleiter vom gewünschten Funktionselement ab. So ist in einer Ausführungsform der Erfindung vorgesehen, die Modifikationen circumferent anzuordnen, so dass bei einem Auskoppelement eine
30 definierte radiale Abstrahlung über eine definierte Länge erfolgt (z. B. bei einem Streulichtapplikator, wie er in der Medizin zum Eintrag von Laserlicht ins Gewebe eingesetzt wird).

Eine andere Ausführungsform sieht vor, die Modifikationen im Lichtwellenleiter definiert punktuell an einer ausgesucht begrenzten Stelle einzuführen, so dass eine Abstrahlung nur in einer Richtung erfolgt, oder dass diese Stelle als Einkoppelement dienen kann. Weitere mögliche Ausführungen der
 5 Modifikationen an der Grenzfläche Faserkern-Fasermantel sind Linien, Kreisbögen und Flächen unter definierten Winkel und Längen und Kombination aus diesen Ausführungsbeispielen. Im Ergebnis des erfindungsgemäßen Verfahrens der Modifikationen im Lichtwellenleiter können somit komplexe Strukturen wie z. B. Gitter, photonische
 10 Bandgapstrukturen, etc. sowohl radial als auch longitudinal eingebracht werden je nach gewünschtem Funktionselement.

In dem erfindungsgemäßen Verfahren können die Modifikationen an beliebiger Stelle (jeweils in der Grenzfläche Lichtwellenleiterkern
 15 Lichtwellenleitermantel) und in beliebiger Form sowohl nur als Brechungsindexänderung als auch als massive Streuzentren sowie als Kombination beider Modifikationen ausgeführt werden.

Weitere Ausführungsformen der Erfindung sind in den Unteransprüchen und
 20 in dem folgenden Ausführungsbeispiel angegeben, das anhand von Figuren näher erläutert wird.

Figur 1 zeigt ein Prinzipbild für die Erzeugung der Modifikationen im Lichtwellenleiter. Dabei wird der Laserstrahl 1 mit Hilfe eines
 25 Mikroskopobjektivs 2 in der Grenzfläche Lichtwellenleiterkern 4 – Lichtwellenleitermantel 3 fokussiert. Durch Variation des Abstandes 5 zur Faser kann der günstigste Bereich im Übergang zwischen Lichtwellenleiterkern und Lichtwellenleitermantel eingestellt werden. Durch Rotation 6 kann eine radiale Modifikation erzeugt werden.

30 Das Ausführungsbeispiel in Figur 2 zeigt in einer Mikroskopaufnahme die entsprechende Ansicht der Modifikation einer Quarzglasfaser (\varnothing = Kern 600/ Mantel 660 μ m) bei der durch Verschieben des Mikroskopobjektivs (40X,

NA = 0,63) in Richtung 5 (Fig. 1) des Faserkerns die Modifikation in unterschiedlicher Tiefe erfolgte. Verwendet wurden Laserimpulse einer Wellenlänge von 800 nm, einer Impulsdauer von 0,2 ps, einer Einzelpulsenergie von 2,3 μ J und einer Wiederholrate von 1 kHz. Die größere
5 Tiefe ist in den Modifikationen auf der rechten Bildseite.

In einem anderen Ausführungsbeispiel wurden für die laser-induzierte Modifikation einer Quarzglasfaser (\varnothing =Kern 600/Mantel 660 μ m) Laserimpulse einer Grundwellenlänge von 800 nm, einer Impulsdauer von 3 ps und einer Einzelpulsenergie von 3,8 μ J verwendet. In Figur 3 ist das Abstrahlen aus den modifizierten Bereichen dieser Quarzglasfaser gezeigt, wobei an einem Ende der Faser ein He-Ne-Laser eingekoppelt wurde.

In Figur 4 ist die gesamte abgestrahlte Leistung der Faser aus Figur 3 im Verhältnis zur der in die Faser eingekoppelte Leistung in Abhängigkeit vom Modifikationsort dargestellt. Die Abstrahlung ist so stark, das auf eine Modifikationslänge von 6 mm die Leistung am Faserende auf 10 % der eingekoppelten Leistung sinkt. Die Modifikationen erfolgten radial mit einem Abstand von 10 μ m.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Mikrostrukturierung von Lichtwellenleitern zur Erzeugung von optischen Funktionselementen

5 dadurch gekennzeichnet, dass

durch Laserstrahlung, mindestens eines ultrakurzen Einzelpulses oder einer Pulsfolge mit definiertem Energieeintrag eine Modifikation in der Grenzfläche zwischen Lichtwellenleiterkern – Lichtwellenleitermantel erfolgt, wobei die Modifikation zu einer Änderung seiner optischen Eigenschaften durch Brechungsindexänderung oder auch massiven Materialabtrag oder Transformation der Phase des Materials an der bestrahlten Stelle führt.

2. Verfahren nach Anspruch 1,
dadurch gekennzeichnet, dass

15 der Laserstrahl mit Hilfe eines Mikroskopobjektivs in der Grenzfläche Lichtwellenleiterkern – Lichtwellenleitermantel durch den Lichtwellenleitermantel fokussiert wird.

3. Verfahren nach Anspruch 1 und 2,

20 dadurch gekennzeichnet, dass

die Modifikationen unterhalb der Oberfläche in der Gradientenindex-Lichtwellenleitern erfolgen.

4. Verfahren nach Anspruch 1 bis 3,

25 dadurch gekennzeichnet, dass

die Modifikationen an beliebiger Stelle des Lichtwellenleiters (jeweils in der Grenzfläche Lichtwellenleiterkern - Lichtwellenleitermantel) und in beliebiger Form sowohl nur als Brechungsindexänderung als auch massive Streuzentren als auch Phasentransformationen sowie als Kombination von zwei oder allen
30 drei Modifikationen ausgeführt werden.

5. Verfahren nach Anspruch 1 bis 4,
dadurch gekennzeichnet, dass
die Modifikationen radial so angeordnet werden, dass eine gleichmäßige
definierte radiale Abstrahlung von dem in den Lichtwellenleiter an einem Ende
5 eingekoppelten Licht im modifizierten Wellenleiterbereich erfolgt.

6. Verfahren nach Anspruch 1 bis 4,
dadurch gekennzeichnet, dass
die Modifikationen im Lichtwellenleiter komplexe Strukturen wie Gitter, Spirale,
10 Kreuze, Photonische Bandgapstrukturen und Kombinationen aus Linien und
Punkten sind, sowohl in radialer als auch longitudinaler Richtung des
Lichtwellenleiters.

7. Verfahren nach Anspruch 1 bis 6,
15 dadurch gekennzeichnet, dass
mit den Modifikationen im Lichtwellenleiter eine Einkopplung oder
Auskopplung oder eine beliebige Kombination von beidem im Lichtwellenleiter
erfolgen kann.

20 8. Verfahren nach Anspruch 1 bis 6,
dadurch gekennzeichnet, dass
die Modifikationen in Lichtwellenleiter aus Quarz, Glas, Glaskeramik,
Kunststoffen, Fluoriden oder ähnlichen transparenten Materialien bzw.
Materialkombinationen erzeugt werden können.

25 9. Verfahren nach Anspruch 1 bis 6,
dadurch gekennzeichnet, dass
die modifizierten Lichtwellenleiter für die Medizintechnik oder für die
Telekommunikation oder für die Sensortechnik oder für ähnliche Bereiche
30 genutzt werden können.

Zeichnungen:

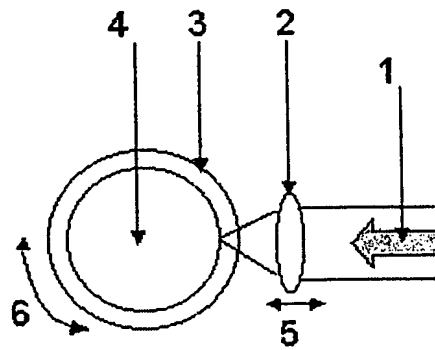


Fig. 1

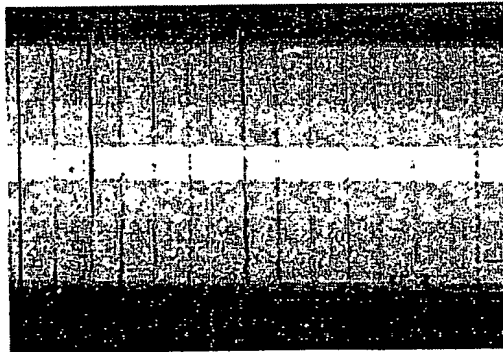


Fig. 2

Zeichnungen Fortsetzung.

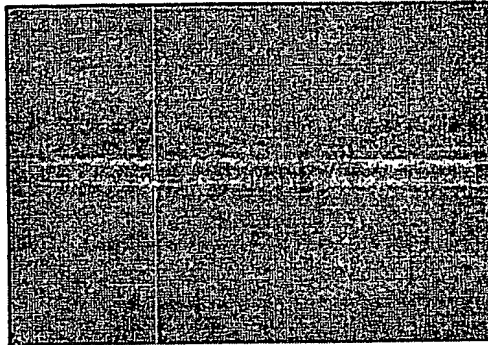


Fig. 3

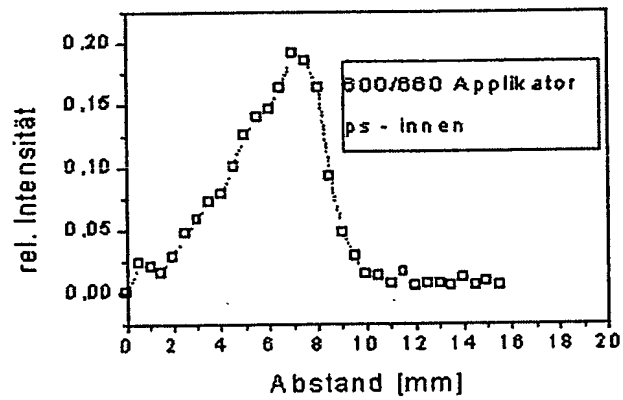


Fig. 4